

微粉炭燃焼ボイラの燃焼解析技術

Development of Computer Program for Combustion Analysis in Pulverized Coal-Fired Boiler

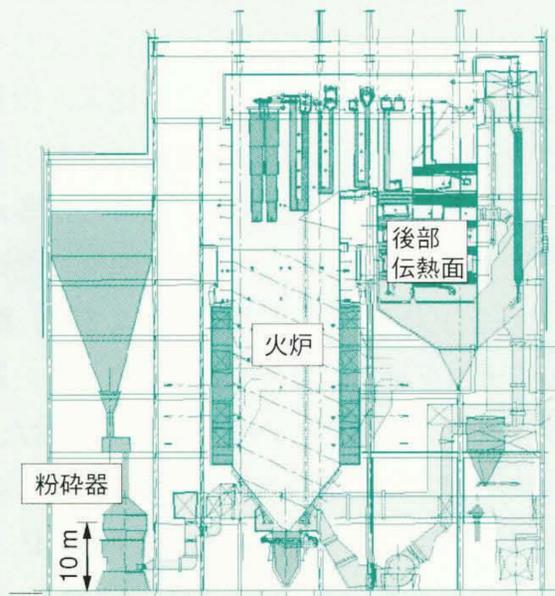
山本 研二 Kenji Yamamoto

下郡 嘉大 Yoshio Shimogōri

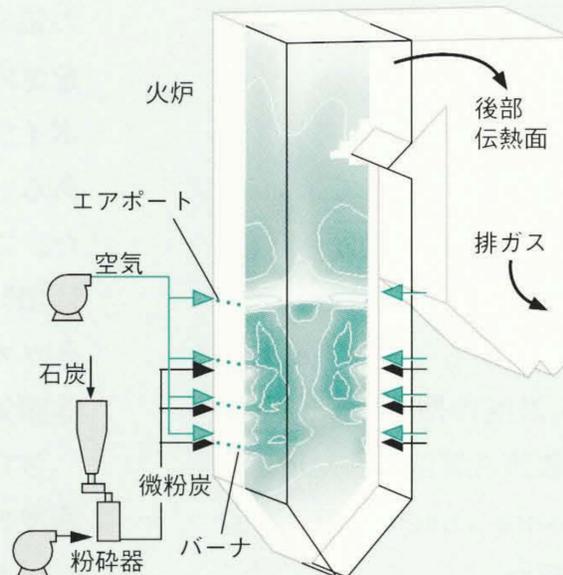
福地 健 Takeru Fukuchi

松田 順一郎 Jun'ichirō Matsuda

茶木 雅夫 Masao Chaki



(a) ボイラの構造



(b) 計算結果の例(温度分布)

微粉炭燃焼ボイラの燃焼解析

ボイラの心臓部である火炉の設計には、燃焼状態を予測する手段が不可欠である。このプログラムでは、バーナからの燃料量とエアポートからの空気量を基に火炉内の燃焼場を計算する。

微粉炭燃焼ボイラの設計にあたっては、(1) 燃料の燃焼が十分に進むこと、(2) 環境汚染物質の排出が少ないこと、および(3) 火炉出口蒸気温度が一様であることが要求される。全負荷から部分負荷にわたってこの要求を満足し、かつ経済的に実現するためには、火炉内の流動・燃焼・伝熱挙動を解析する技術が必要となる。この目的のため、微粉炭の燃焼、輻(ふく)射伝熱、水壁管内の流量配分・温度変化をシミュレーションする解析プログラムを開発した。

微粉炭の燃焼については、石炭粒子の燃焼基礎試験に基づき、熱分解モデル、チャー燃焼モデル、NO_x・COの生成モデルを作成した。火炎-水壁間の輻射伝熱に関しては、ガスの輻射物性をガス組成から計算するモデルを組み込み、精度が高く計算負荷の少ないDT(Discrete Transfer)法を用いて熱輸送量を計算する。また、水壁管内二相流の熱流動を解析するため、任意の流路ネットワーク内に適用できるアルゴリズムを開発した。種々の石炭や負荷状態での火炉運転データと、このプログラムによる計算結果を比較し、火炉出口ガス温度を±30℃で予測できることを確認した。この技術は、最新の1,000 MW級ボイラの設計はもちろんのこと、既設プラントの改良設計にも活用している。

1 はじめに

微粉炭燃焼ボイラでは、効率向上、信頼性向上、環境負荷低減などの性能向上が要求されている。具体的には、(1) 灰中未燃分が少ないこと、(2) 排ガス中のNO_x、COが少ないこと、(3) 壁面への熱負荷分布に極端なピークがなく、火炉出口蒸気温度が一様であることが必要である。ボイラ内では流動・燃焼・水壁管内の伝熱などの現象が相互に作用することから、いかなる運転状態でもこれらの要求を満たすボイラを設計するには、火炉内の現象を総合的に解析する技術が必要である。この目的のため、

石炭粒子の燃焼基礎試験とバーナ性能試験の結果をベースに、物理モデルに基づく解析プログラムを開発した。

ここでは、このプログラムに採用したモデルの特徴と、実機を対象にした検証結果について述べる。

2 プログラムの機能と構成

このプログラムは、ボイラの寸法・水壁管の配置・接続状態に関する形状データと、燃料・空気流量や給水流量・出口圧力などの境界条件を与えることにより、火炉内のガス流速・温度分布、ガス組成分布、水壁への熱負荷、水管内流量・温度を計算する。プログラムの構成

は、燃焼計算部と水壁管内流動計算部に分けられる。燃焼計算部では、ガス流動、石炭と気相の反応、輻射伝熱の現象を解析する。燃焼解析により、水壁の熱吸収分布(熱負荷)が決まる。水壁管内流動計算部では、燃焼解析で得られた熱負荷を入力し、水管ごとの流量と温度変化を解析する。

3 石炭燃焼モデル

火炉内の流速・温度分布は、空気・燃焼ガスの質量・運動量・エネルギー保存則を解くことによって求める。石炭粒子は気相に同伴されるとし、各ガス成分と同様、輸送方程式を解いてその分布を定める。石炭粒子は、水分・ボラタイル、チャー、灰分から成るとする。それぞれの反応速度定数を温度・酸素濃度の関数として与えて、各成分の変化を計算する。数値計算法はSIMPLE法(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)であるが、バーナ近傍には特に細かいメッシュを設けることのできる複合メッシュを採用しており、状態が急変する部分での計算精度を高めている。

このプログラムには、灰中未燃分、NO_xやCOなどのガス濃度を予測するモデルを組み込んでいる。それぞれのモデルは、石炭種、空気比、温度を変えた基礎実験デ

ータを基に開発した。このモデルにより、これまで困難であったNO_x濃度の予測を可能にした。計算結果の例を図1に示す。

二段燃焼法では、還元雰囲気を形成することでNO_xをN₂に還元する。NO_x濃度を予測するためには、還元雰囲気の燃焼率やガス組成を予測することが必須である。この領域で石炭中のチャーはCO₂やH₂Oと反応し、COやH₂を生成する。これを「ガス化反応」と呼ぶ。従来、微粉炭ボイラ内ではチャーとO₂の反応である酸化反応が主体であるとして、ガス化反応の計算を省略することが多かった。この反応の計算を省略すると、還元雰囲気で燃焼率に10%程度の誤差を生じる。このプログラムでは、酸化とガス化反応のモデルを新たに開発することにより、還元雰囲気内の燃焼率やガス組成の予測精度を向上させた¹⁾。

さらに、NO_xの予測には、CO₂やH₂O、CO、H₂などの高濃度のガス組成だけでなく、微量組成であるCH、OHラジカル濃度の予測が重要である。このプログラムでは、ラジカルの濃度を高精度に計算するモデルを組み込むことにより、NO_xの予測精度も向上させた。火炉中央に形成される空気比の低い領域では、CHラジカルによる還元反応によってNO_xが低下する(図1参照)。

4 輻射伝熱モデル

大型ボイラの場合、火炉内の燃焼ガスから周囲水壁への伝熱は、ほとんどが輻射伝熱による。水壁上の熱流束分布は水壁管内蒸気温度の分布に影響し、水壁伝熱量は火炉出口ガス温度を決定する。このため、火炉解析では輻射伝熱のモデル化が重要である。

輻射伝熱では、高温のガスや粒子(輻射性媒体)の熱が電磁波(輻射)として火炉内を放射状に伝わる。この電磁波が火炉の境界面である水壁に吸収された結果として、熱が移動する。

解析上は、輻射性媒体の物性モデルと輻射輸送モデルが必要である。

輻射性媒体とは電磁波を放射、吸収する物質であり、微粉炭燃焼場で対象となる気体分子(H₂O、CO₂)と固体粒子(原炭、チャー、フライアッシュ、すす)の輻射物性をモデル化した。気体分子に対しては、光学データベースの一種である“Weighted Sum of Gray Gases”を採用した。一方、固体粒子の特性は「Mie散乱理論」によって与えた。これは、粒径、電磁波の波長、粒子材質の光学的性質(複素屈折率)から粒子の輻射物性を求めるものである。また、計算時間を短縮するために、「幾何光学理

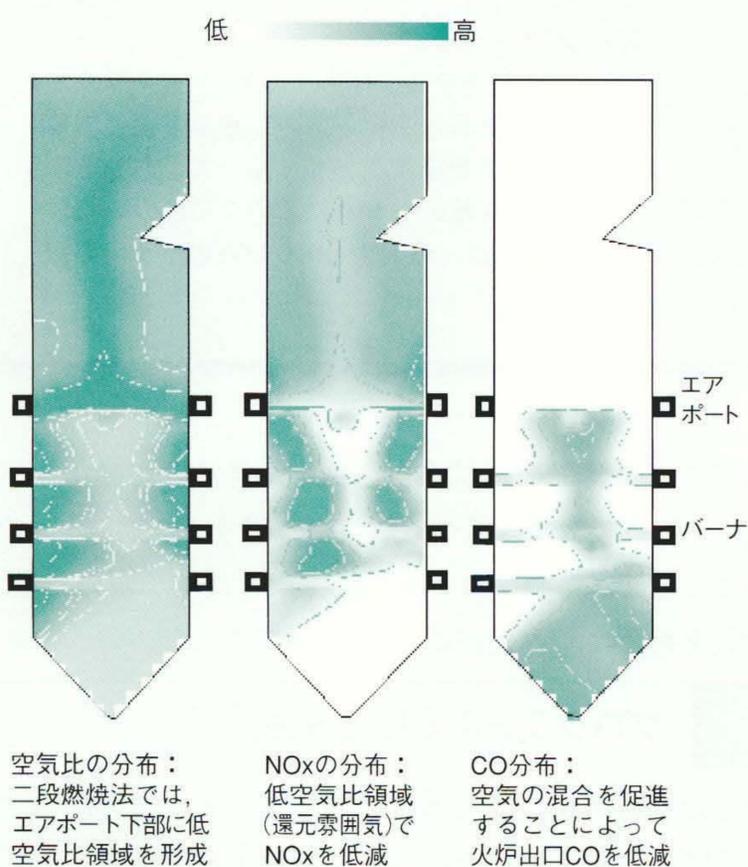


図1 火炉内の燃焼解析例

二段燃焼法では、バーナ付近の空気比を精密に制御することにより、環境汚染ガスの生成・排出を抑制する。

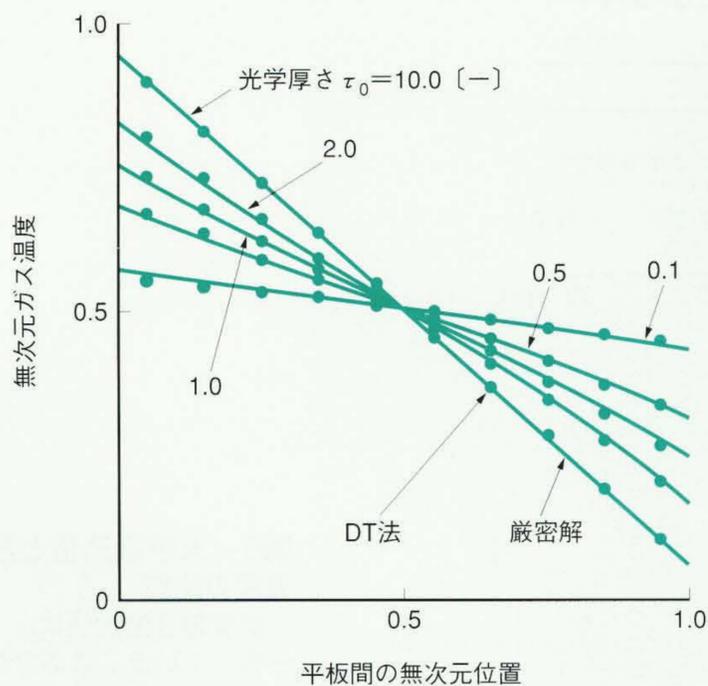


図2 輻射輸送の厳密解とDT法の比較

ここに示す基本的な一次元系だけでなく、複雑形状の三次元系でもDT法の解は厳密解とほぼ一致する。

論」と「Rayleigh散乱理論」も併用したが、これらはそれぞれ、粒径が大小の極限でMie散乱理論の近似となる。

輻射輸送のモデル化にはDT法(光線追跡法的一种)を採用した²⁾。この方法では、実用上許容できる少ない計算負荷で、厳密解とほぼ一致する解を得ることができる。その一例として、一次元系(温度の異なる2枚の平板間の輻射性ガス)での輻射輸送の計算結果を図2に示す。DT法の解は、種々の光学厚さ(ガスの不透明度)で厳密解と一致している。

5 水壁管内熱流動モデル

微粉炭燃焼ボイラ火炉の水壁設計では、構造の最適化や健全性向上のため、水壁の詳細な温度分布予測が重要である。

従来は粗いメッシュで温度分布を評価していたので温度予測の精度に限界があり、さらにバーナパターンや炭種の変化に伴う燃焼・熱負荷分布の変化に対応できないことから、過剰な設計マージンが必要であった。

1,000 MW級の火炉水壁には、通常、約2,000本の水管と約60体の管寄(水管が流入、流出する管状の構造物)がある。これらの水管と管寄が、複雑な流路ネットワークを形成している。したがって、局所的な温度分布を予測するには、この流路ネットワーク全体をメッシュ分割し

て解く必要がある。そのため、原子力分野で実績のある熱流動モデルを応用するとともに、ボイラに適した新しいアルゴリズムを開発することにより、複雑な流路ネットワークの解析を可能とした。この技術では、すべての水管と管寄の解析メッシュで、質量・運動量・エネルギー保存則を解く。水管の流量配分は、各水管の圧力損失と管寄での質量保存則などから決める。流路ネットワーク内の水は、運転状況により、液単相、二相流、過熱蒸気、圧縮水、超臨界水などさまざまに変化する。この解析モデルはこれらすべての状態に対応しており、火炉の幅広い運転状況で定常および過渡解析が可能である。

ここで開発した水壁管内流動モデルと前述の石炭燃焼モデル、および輻射伝熱モデルを統合することにより、水管1本1本の熱流動特性を詳細に把握することができるようになった。

6 実プラントでの測定値との比較

上記のように、このプログラムは各要素過程を表現する物理モデルを組み合わせて作成してある。全体としての計算精度を検証するために、実プラントでの測定結果とこのプログラムによる解析結果を比較した。比較した項目は、輻射熱負荷分布や灰中未燃分、ガス中NO_x濃度など多岐にわたる。特にガス側の熱収支を表す火炉出口ガス温度は、 $-23 \sim +28$ °Cの範囲で一致していることを確認した。これは、複数のプラントの異なった負荷状態・炭種について計算を行い、測定値と比較した結果である。

また、このプログラムの特徴は、燃焼モデルから連続して水蒸気側モデルの計算を可能にした点である。ここでは、水蒸気側の熱収支を最も良く表す火炉吸熱量と、火炉出口蒸気温度を比較した結果について述べる。

計算は、大容量石炭燃焼変圧貫流ボイラでの負荷上昇時の火炉吸熱量と火炉出口蒸気温度について行い、測定値を比較した。実運用で最高レベルの変化率である負荷が4%/minで上昇する過程での火炉吸熱量と火炉出口蒸気温度を図3に示す。計算値は測定値とおおむね一致しており、火炉吸熱量と、火炉出口蒸気温度の変化が予測できる。

以上のように、このプログラムでは、燃焼ガス側と水蒸気側の温度を精度よく計算できることが確認できた。これは、各要素過程の現象を忠実に表現する物理モデルを使用した成果であると考えられる。

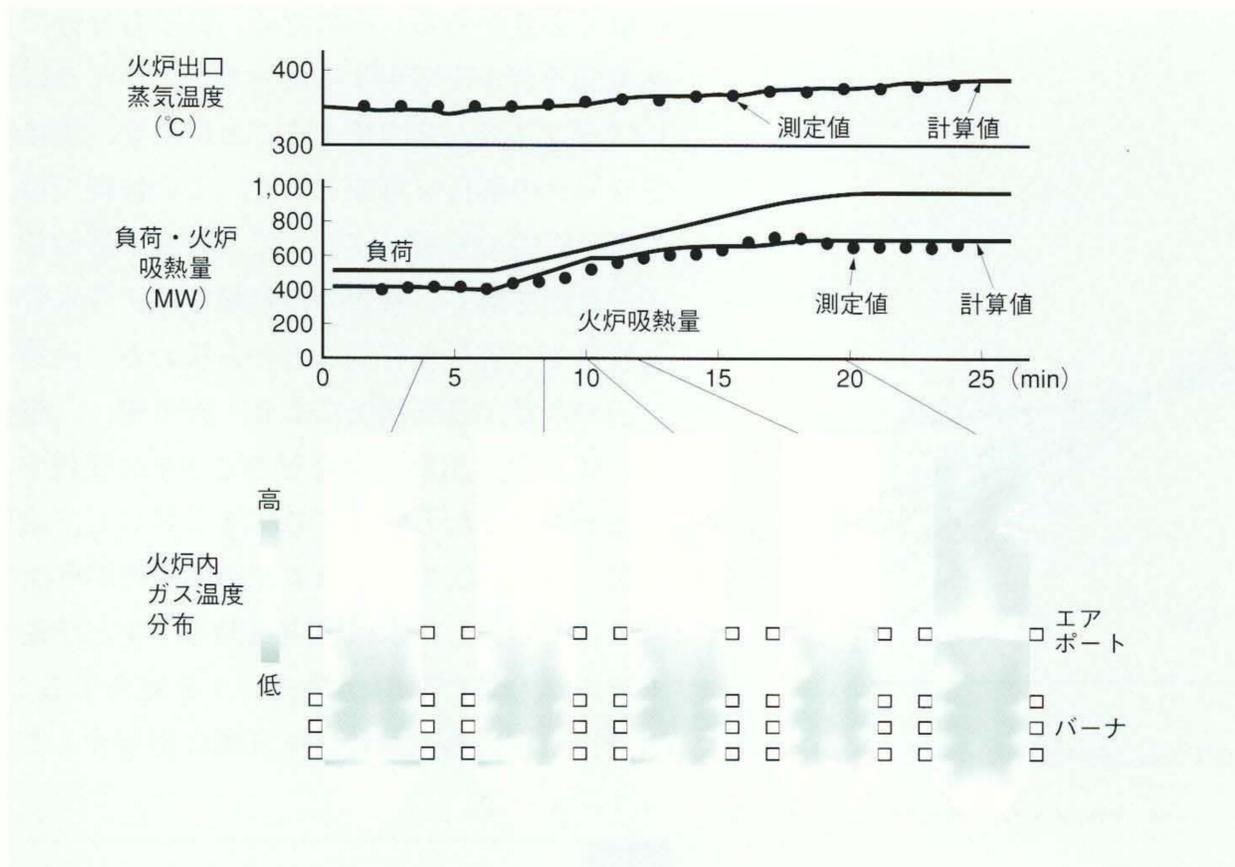


図3 火炉吸熱量と蒸気温度の比較
 計算値と測定値は、よく一致している。このプログラムは、定常状態だけでなく、過渡状態の予測にも適用できる。

7 おわりに

ここでは、微粉炭燃焼ボイラの特長解析プログラムの概要と、実測値との比較による検証について述べた。

このプログラムは、火炉出口ガス温度や水壁管内蒸気温度といった伝熱特性だけでなく、NOxなどの微量ガス成分の生成と消滅も取り扱うことができる。このプログラムで用いたモデルは物理現象に立脚しているので、負荷や石炭種などの運用条件の変化に対する、NOx濃度、未燃分、蒸気温度などの総合的なボイラの特長を予測することが可能である。

このプログラムは最新のプラントの設計にも適用され、その性能予測に役立っている。解析プログラムの信頼性をさらに向上させ、また、適用範囲を広げるため、今後も、実プラントの運転状態との比較とプログラムの機能の改良を進めていく考えである。

参考文献

- 1) 山本, 外: 微粉炭燃焼場におけるチャーの表面反応モデル, 日本機械学会論文集B編 65-637, pp. 260~266(1999)
- 2) F.C.Lockwood, et al.: A New Radiation Solution Method for Incorporation in General Combustion Prediction Procedures, 18th Symposium(International) on Combustion, pp.1405~1414(1981)

執筆者紹介



山本 研二
 1995年日立製作所入社, 電力・電機グループ 電力・電機開発研究所 環境システム部 所属
 現在, 燃焼システムの研究開発に従事
 日本機械学会会員
 E-mail: kyamamo@erl.hitachi.co.jp



福地 健
 1991年バブコック日立株式会社入社, 呉研究所 火力研究部 所属
 現在, 火炉内伝熱の研究開発に従事
 工学博士
 日本機械学会会員, 日本伝熱学会会員
 E-mail: fukuchi-t@krl.bhk.co.jp



茶木 雅夫
 1993年日立製作所入社, 電力・電機グループ 電力・電機開発研究所 原子力・産業第1部 所属
 現在, 原子力・火力システムの研究開発に従事
 工学博士
 日本原子力学会会員
 E-mail: mchaki@erl.hitachi.co.jp



下郡 嘉大
 1991年バブコック日立株式会社入社, 呉事業所 火力事業本部 プロジェクト統括部 所属
 現在, 事業用ボイラの見積計画, 基本設計・開発に従事
 火力原子力発電技術協会会員
 E-mail: simogori@kure.bhk.co.jp



松田 順一郎
 1984年バブコック日立株式会社入社, 統括技術本部 火力技術部 所属
 現在, 事業用ボイラの基本計画・開発に従事
 火力原子力発電技術協会会員
 E-mail: matudaj@tho.bhk.co.jp